

# 机械设备状态监测无线传感器网络研究进展\*

汤宝平<sup>1,2</sup>, 黄庆卿<sup>2</sup>, 邓 蕾<sup>2</sup>, 刘自然<sup>1</sup>

(1. 河南工业大学机电工程学院 郑州, 450007) (2. 重庆大学机械传动国家重点实验室 重庆, 400030)

**摘要** 通过分析无线传感器网络(wireless sensors network, 简称 WSN)的优势和潜能, 提出将无线传感器网络应用于机械设备状态监测中, 以弥补目前有线连接的机械设备状态监测系统的局限性。针对目前机械设备状态监测中所用的无线传感器网络节点硬件性能偏低、采样频率也低、缺乏信号同步采集研究、对大量数据快速可靠传输研究偏少、对于反映机械设备状态最关键的机械振动的监测还难以实现等问题, 提出要实现基于无线传感器网络的机械设备状态监测, 必须解决高速同步采集、实时可靠传输和能量供应等难题。指出了低成本、低功耗、微型化、网络化、多功能化将是无线传感器网络在机械设备状态监测应用中的发展方向。

**关键词** 机械设备状态监测; 无线传感器网络(WSN); 同步采集; 可靠传输

**中图分类号** TH17

## 1 无线传感器网络概述

所谓无线传感器网络<sup>[1]</sup>是由部署在监测区域内大量廉价小型或微型的各类集成化传感器节点协作地实时感知、监测各种环境或目标对象信息, 通过嵌入式系统对信息进行智能处理, 并通过随机自组织无线通信网络以多跳中继方式将所感知的信息传送到用户终端, 真正实现“无处不在的计算”理念, 常见架构如图 1 所示。

无线传感器网络综合了传感器技术、嵌入式计算技术、现代网络及无线通信技术、分布式信息处理

技术等, 是当前备受关注的、涉及多学科高度交叉、知识高度集成的热点研究领域之一。它的主要特点是: 节点硬件资源有限、能量效率要求高、无中心、自组织、多跳路由、动态拓扑、节点数量众多、分布密集。最具代表性的是美国加州大学伯克利分校提出的“智能尘埃 Smart Dust”<sup>[2]</sup>, 如图 2 所示, 微米级的包含传感和通信的平台, 具有计算、双向无线通信能力, 采用光信号传输, 自带电源。当前研究热点主要为: 微纳节点、通信协议、传感器网络管理、传感器网络数据管理、应用支撑服务等。

无线传感器网络是一种全新的信息获取和处理

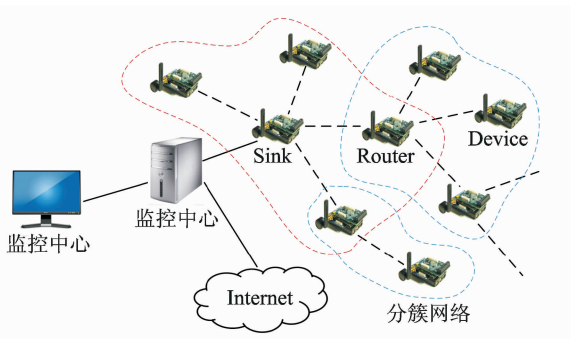


图 1 无线传感器网络架构

Fig. 1 Architecture of wireless sensor networks

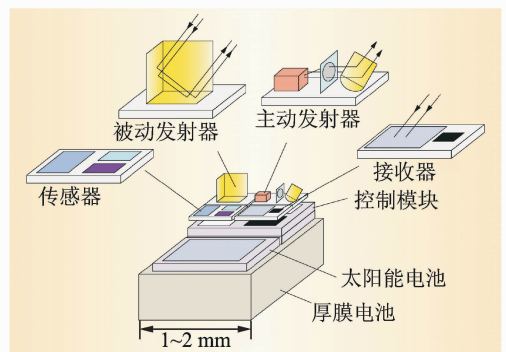


图 2 智能尘埃模型

Fig. 2 Model of smart dust

\* 国家自然科学基金资助项目(51375514); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20130191130001)  
收稿日期: 2013-12-30; 修回日期: 2014-01-09

技术,可以在长期无人值守的状态下工作,能够实时监测、感知和采集各种环境或监测对象的信息,在军事、工业、医疗、环境监测、交通管理和抢险救灾等领域有着巨大的应用价值和潜在的应用前景<sup>[3-10]</sup>,如图 3 所示。在军事上可监控敌方部署、装备、军火情

况,战场监视、定位,核、生化武器攻击监测和侦察。在环境方面可进行森林防火、洪水监测、污染监控、精准农业和生物种群研究等。在医疗方面可进行无线监测人体生理数据、医院药品管理和远程医疗等。另外,在空间探索、结构健康监测也有很好的应用前景。

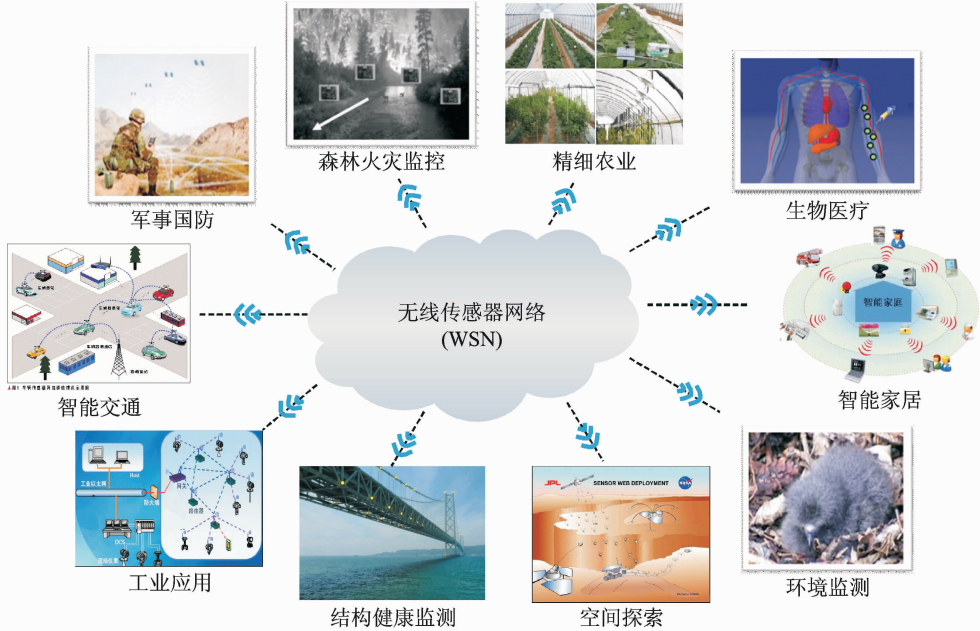


图 3 无线传感器网络应用领域

Fig. Applications of wireless sensor networks

但是,无线传感器网络技术目前还很不成熟,作为一个自治系统,涉及到定位及时间同步、协同信号处理、通信模式及协议、网络容量、能耗、寿命、任务分配协调控制、自适应性和中间件等诸多问题。

## 2 WSN 在机械设备状态监测中的应用前景

目前已有的机械设备状态监测系统,无论是集中式还是分布式系统,均需要将各传感器提供的状态信号通过相应的有线电缆传输至数据处理中心,如图 4 所示,以实现状态信号的分析处理和故障诊断。这种基于有线连接的机械设备状态监测系统由于存在以下不足而影响机械设备状态监测与故障诊断的质量:a. 部署成本较高,多采用有线连接,需要耗费大量的线缆和相应硬件,限制了安置在机械设备上的传感器的数量;b. 可维护性差,大量有线连接给状态监测系统的可靠运行带来风险,随着时间的推移,这些线缆不可避免地会发生老化或出现故障,导致维修复杂和高昂的维修成本;c. 缺少机动灵活性,系统一旦部署好,就不能随便增删监测点和改

变布局;d. 监测对象和范围有限,对于大量移动和旋转的设备或部件,无法对传感器进行有线连接,对分布范围广的机械设备难以有效完成监测任务;e. 冗余容错能力差,大量部署的传感器及有线多通道采集系统,会受环境因素的影响而失效,对传统状态监测系统来说,这种失效往往只能通过人工排查确定,无自动识别的能力。



图 4 基于有线连接的状态监测系统

Fig. 4 Condition monitoring systems based on wired connection

根据无线传感器网络应用分析发现<sup>[11-16]</sup>,无线传感器网络监测模式可以弥补传统有线机械设备状态监测系统的不足,其优势如下:a. 由于无线传感器网络节点具有局部信号处理功能,很多信号处理工

作可在传感器节点附近完成,将大大减少所需传输的信息量,原来由中央处理器实现的串行处理、集中决策的监测系统,将变成一种并行的、分布式的信息处理系统,极大提高监测系统的运行速度及决策的可靠性和灵活性;b. 用无线传感器网络取代传统有线传感器装置,可以减少工业现场布线,降低监测系统部署成本,增加监测系统的灵活性、可维护性和可扩展性;c. 网络具有容错能力,安装在机械设备上的传感器会受环境因素的影响而失效,而无线传感器网络允许节点有一定的故障率,一旦有传感器失效,网络将自动重新组网,从而使监测系统能够正常工作;d. 网络中的部分节点可以移动,拓扑结构具有动态性,当传感器节点移动时,可通过协议来适应网络拓扑结构的动态变化,所以无线传感器网络可实现对移动和旋转的设备或部件的振动监测;e. 网络节点数量大、密度高,对于分布范围广、跨越地域较大、设备数量多、监测点分散、移动性强的设备监测,可以很方便地采用无线传感器网络组建监测系统。

### 3 WSN 在机械设备状态监测中的研究进展

在机械设备状态监测领域,国内外已开始着手研究基于无线传感器网络的机械设备状态监测技术。一种是基于商用 Crossbow 公司的 MICAz 或者 MICA2 节点进行状态监测,如图 5 所示;另一种是自研节点进行状态监测。

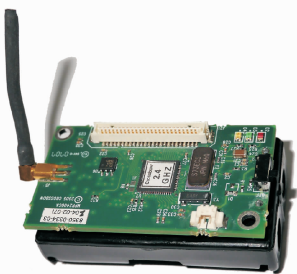


图 5 MICAz 节点

Fig. 5 MICAz node

美国能源部、通用电气全球研究院、Sensicast 公司、Rensselaer 工学院为改善马达功效、消减能源损耗、减少组建马达监测系统的成本、促进整个工业马达系统节能高效化,早在 2004 年就开始联合开发用于工业马达系统监测的无线传感器网络。BP, Crossbow 和 Intel 公司在 2004 年开展了一项 Loch Rannoch 工程,利用 Mote 节点和 150 个加速度传感器对油轮的马达、泵之类具有强振动的设备进行

监测<sup>[17]</sup>,如图 6 所示。

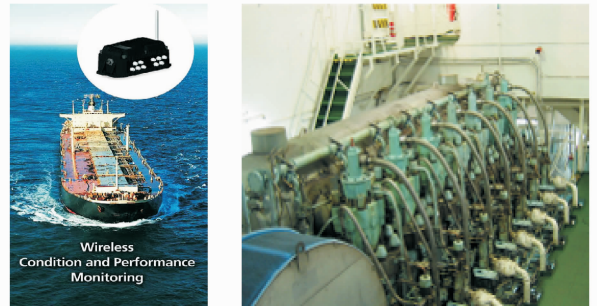


图 6 基于 Mote 节点的油轮设备监测

Fig. 6 Oil tanker equipment monitoring based on Mote node

Gao 等<sup>[18]</sup>研发了一种无线传感器网络,能监控多种参数,并通过数据集中和数据融合等将各种数据综合,监测和控制印刷机器运行状态,设计的节点如图 7 所示。Tan 等<sup>[19]</sup>采用无线传感器网络对数控机床刀具磨损状况进行实时监测,利用 MICA2 节点与 MTS310 传感器板完成数据采集与传输,采样频率为 2 kHz,如图 8 所示。Lu 等<sup>[20]</sup>利用 WSN 对电机系统进行监测,将电机运行参数采集并发送到中央监控站,对其健康状态进行评估,如图 9 所示,采样频率为 4 kHz。Nasipuri 等<sup>[21]</sup>采用无线传感器网络对变电站中变压器的风机和空气压缩机进行基于振动信号的健康监测,使用 74 个 MICAz 节点,主要传感板为 MTS310 和 MTS300,使用的 MEMS 传感器带宽为 50 Hz,如图 10 所示。Notay 等<sup>[22]</sup>利用无线传感器网络组建飞机结构健康监测系统,将传感器布置在飞机内部的一些需要长期监测的最佳位置,比如在机翼内部布置节点采集振动信号,如图 11 所示。Hou 等<sup>[13]</sup>提出了基于 WSN 的设备状态监测与故障诊断方法,在传感器节点上进行特征提取和故障识别,减少了数据传输量,采样频率为 3.1 kHz,如图 12 所示。

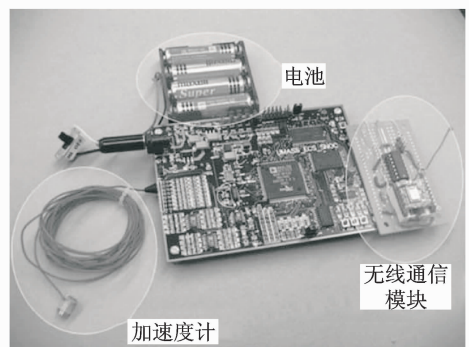


图 7 网络印刷机运行状态监测节点

Fig. 7 Network printer operation condition monitoring nodes



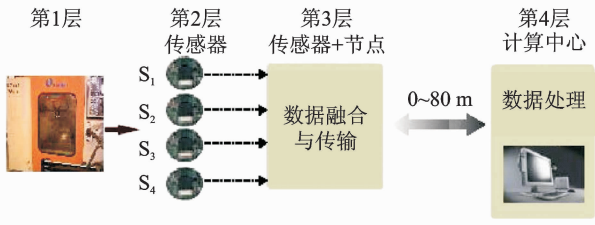


图 8 基于 WSN 数控机床刀具磨损状态监测

Fig. 8 CNC machine tool wear condition monitoring based on WSN

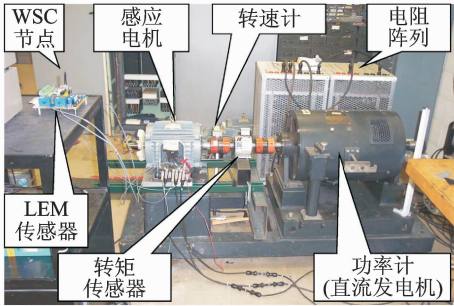


图 9 利用 WSN 对电机系统进行状态监测

Fig. 9 Condition monitoring of motor system based on WSN

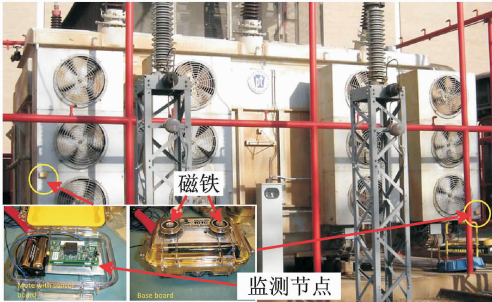


图 10 基于 WSN 的变电站设备健康监测

Fig. 10 Equipment health monitoring in power substations based on WSN

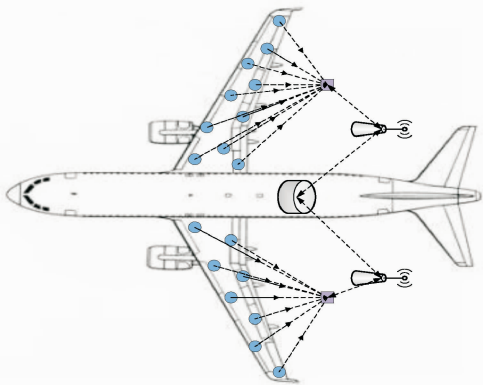


图 11 利用 WSN 对飞机机翼进行状态监测

Fig. 11 Airplane wings condition monitoring based on WSN

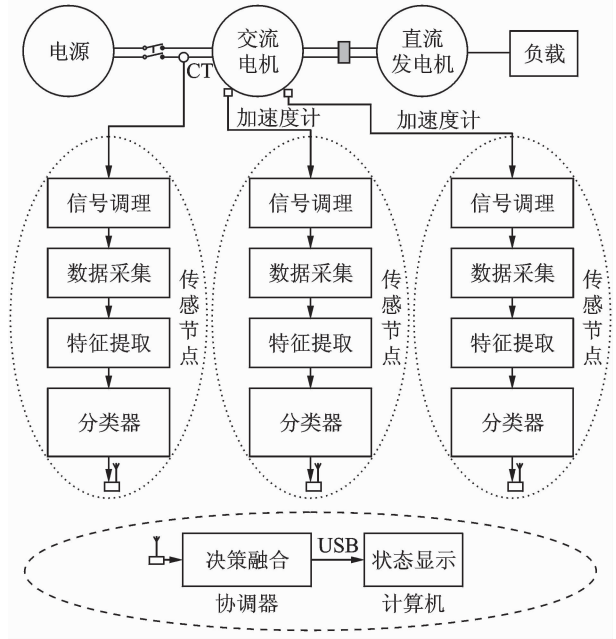


图 12 基于 WSN 的机械状态监测与诊断系统架构

Fig. 12 Architecture of machinery condition monitoring and diagnostic system based on WSN

蔡巍巍等<sup>[23-24]</sup>设计了一种可实现机械振动信号采集和片上处理的无线传感器网络节点,采用 STM32 微控制器(基于 ARM Cortex M3 内核)和 TI 2430 芯片组成的双核心架构,利用 MEMS 加速度传感器拾取振动信号,如图 13 所示。采样频率同样可达到 20 kHz,但多节点同步采集精度不高,单跳网络中最大同步误差在 100  $\mu$ s 左右,双跳和三跳网络的最大误差在 300  $\mu$ s 左右。

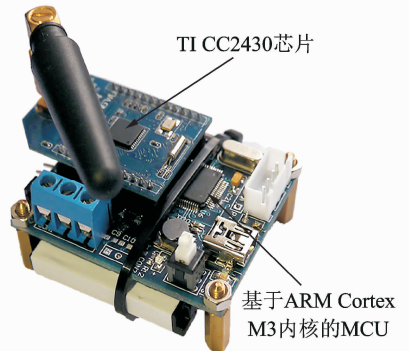


图 13 采用双核心架构的机械振动 WSN 节点

Fig. 13 Machine vibration WSN node based on dual-core architecture

上述在机械设备状态监测中所用的 WSN 节点硬件性能偏低,采样频率也低,缺乏信号同步采集研究、对大量数据快速可靠传输研究偏少、对于反映机械设备状态最关键的机械振动的监测还难以实现。

### 4 研究挑战

由于无线传感器网络自身还不成熟,目前传感器节点所监测的物理量大多是温度、湿度、压力和光强度等一些缓变量<sup>[3]</sup>,即便已经出现的一些无线振动传感器网络,也主要是针对桥梁、高楼等大型建筑结构的低频振动进行监测<sup>[5]</sup>。要实现基于无线传感器网络的设备状态监测,需要解决的难点和关键问题如下。

1) 无线传感器网络节点对机械参量拾取和高速采集的难题。现有的无线传感器网络节点数据采集单元的采样频率比较低,不能用于频率相对较高的机械参量的测试。现有的各种常用的机械参量传感器不能满足无线传感器网络节点低功耗、小体积的要求,需要研发新型的 MEMS 传感器来完成对机械参量的拾取。如挪威科技工业研究院 (SIN-TEF)、SKF 和 ABB 合作<sup>[25]</sup>研发的用于机械状态监测的 MEMS 加速度传感器,如图 14 所示。

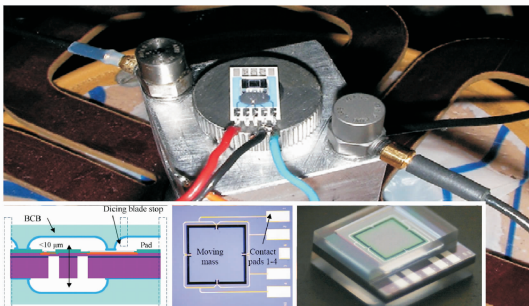


图 14 MEMS 加速度传感器性能测试实验  
Fig. 14 Performance test of MEMS accelerometer

2) 多个无线传感器网络节点间同步采集的问题。机械设备状态监测中往往需要对多测点信号进行同步采集,如模态分析中各个测点的振动数据获取的时间差会导致严重的相位误差。无线传感器网络属于一个分布式系统,在不同的节点中都有着各自的本地时钟,难以实现节点间同步采集。造成同步误差的主要原因包括空间抖动和时间抖动<sup>[26]</sup>,空间抖动指的是节点间起始触发采样时间的不同步,时间抖动指的是单个节点采样间隔的不稳定,如图 15 所示。

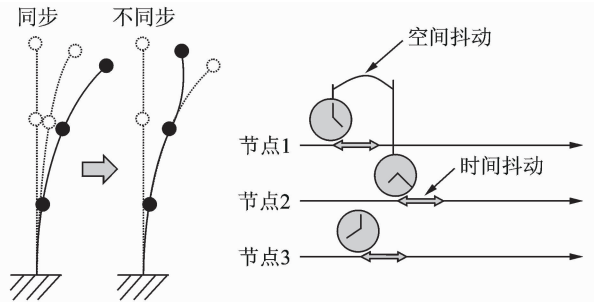


图 15 WSN 同步采集误差示意图  
Fig. 15 Schematic of synchronous acquisition errors in WSN

各种干扰也会对网络通信产生影响,不利于数据的可靠传输。节点数据不停向基站汇聚,越靠近 Sink 节点拥塞越严重,更容易造成数据丢包。Ahn 等<sup>[27]</sup>针对这个问题,提出了一种 funneling-MAC 协议,在数据吞吐量大的区域采用 TDMA/CSMA 混合协议以缓解 WSN 的漏斗效应,如图 16 所示。

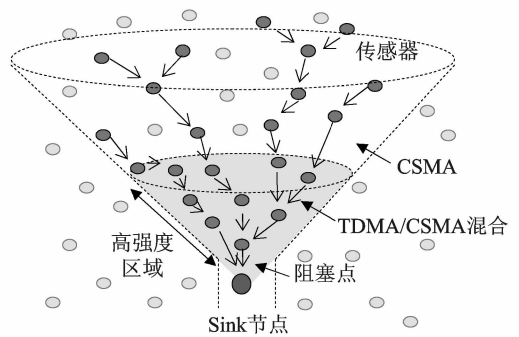


图 16 无线传感器网络的漏斗效应  
Fig. 16 Funneling effect in wireless sensor networks

4) 无线传感器网络能量收集、供应与管理难题。机械设备状态监测中由于需要进行长期不间断的监测和大量数据的可靠传输,对能量的需求很大,这对传感器节点的能量供应提出了很高的要求。一方面,如何实现监测节点的低功耗,最大限度降低节点的能量消耗;另一方面,如何实现监测节点的环境能量(光、热、振动等)收集功能,提升节点的续航能力。Berdy 等<sup>[28]</sup>设计的蜿蜒型低频率压电式振动能量采集器,如图 17 所示。Jang 等<sup>[29]</sup>在此基础上设计出一种由其驱动的无线传感器网络状态监测系统。

5) 无线微纳传感器网络节点设计、制造的难题。针对重大机械装备关键部件在密封、旋转环境等使用过程中的振动、形变和裂痕扩大等故障检测的问题,以及加工过程中切削质量控制、刀具寿命预

3) 大量监测数据在无线传感器网络中连续可靠地传输的问题。机械设备状态监测中一般要求采样频率为 20 kHz 左右,这将产生大量的监测数据,目前的无线传感器网络对于大量无线数据的可靠传输仍然是一个难题。同时,工矿企业监测现场中的

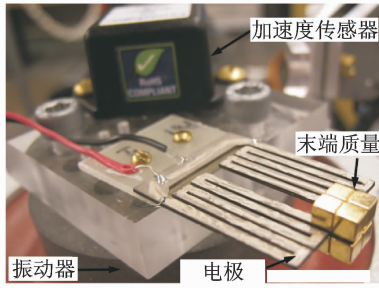


图 17 蜿蜒型压电式振动能量采集器

Fig. 17 Meandering piezoelectric vibration energy harvester

测等需求,对传感器网络节点的微型化提出了更高的要求。Akyildiz 等<sup>[30]</sup>提出的无线纳米传感器网络(wireless nanosensor networks)构想的节点大小应该为  $10 \sim 100 \mu\text{m}^2$ ,能够利用太赫兹信道(terahertz channel)通信,节点的内部抽象架构如图 18 所示。

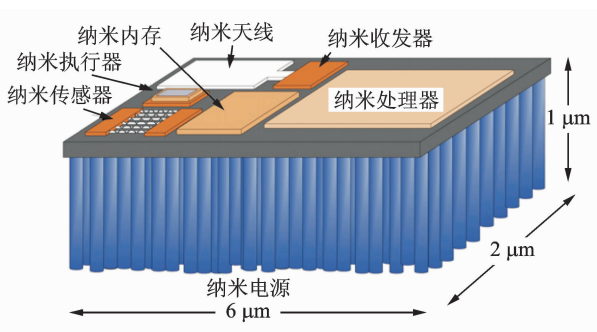


图 18 无线纳米传感器网络节点架构

Fig. 18 Architecture of wireless nanosensor network node

上述难点和关键问题直接影响到无线传感器网络能否应用于机械设备状态监测。从相关报道和有关文献看,尽管国内外对无线传感器网络及其应用的很多,但就机械设备状态监测应用中的难点和关键问题的研究均很少涉及。因此,将无线传感器网络应用于机械设备状态监测,在基础理论和工程技术两个方面还存在一些挑战性的研究难题。

## 5 结束语

机械设备状态监测对无线传感器网络的性能提出了更高的要求,低成本、低功耗、微型化、网络化和多功能化将是无线传感器网络的发展方向。将现代的先进微电子技术、微细加工技术、系统芯片 SOC 设计技术、纳米材料技术、现代信息通讯技术和计算

机网络技术融合,以实现无线传感器网络的微型化、集成化、多功能化、系统化、网络化,满足物联网对无线、无源、多参量微纳传感器及系统的需求。

## 参 考 文 献

- [1] Yick J, Mukherjee B, Ghosal D. Wireless sensor network survey[J]. *Computer Networks*, 2008, 52(12): 2292-2330.
- [2] Warneke B, Last M, Liebowitz B, et al. Smart dust: communicating with a cubic-millimeter computer[J]. *Computer*, 2001, 34(1): 44-51.
- [3] Aqeel-ur-Rehman, Abbasi A Z, Islam N, et al. A review of wireless sensors and networks' applications in agriculture[J]. *Computer Standards & Interfaces*, 2014, 36(2): 263-270.
- [4] Filippini D. Autonomous sensor networks: collective sensing strategies for analytical purposes[M]. [S. l.]: Springer, 2013: 365-394.
- [5] Rice J A, Mechitov K, Sim S H, et al. Flexible smart sensor framework for autonomous structural health monitoring[J]. *Smart Structures and Systems*, 2010, 6(5-6): 423-438.
- [6] Akyildiz I F, Stuntebeck E P. Wireless underground sensor networks: research challenges [J]. *Ad Hoc Networks*, 2006, 4(6): 669-686.
- [7] Hande A, Polk T, Walker W, et al. Self-powered wireless sensor networks for remote patient monitoring in hospitals[J]. *Sensors*, 2006, 6(9): 1102-1117.
- [8] Bottero M, Dalla C B, Deflorio F P. Wireless sensor networks for traffic monitoring in a logistic centre[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2013, 26: 99-124.
- [9] 叶伟松, 袁慎芳. 无线传感网络在结构健康监测中的应用[J]. *传感技术学报*, 2006, 19(3): 890-894.  
Ye Weisong, Yuan Shenfang. Structural health monitoring based on wireless sensor networks[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2006, 19(3): 890-894. (in Chinese)
- [10] 汤宝平, 贺超, 陈仁祥, 等. 基于无线传感器网络的机械振动监测模式[J]. *中国机械工程*, 2009, 20(22): 2737-2741.  
Tang Baoping, He Chao, Chen Renxiang, et al. Pattern of wireless sensor networks for mechanical vibration monitoring application[J]. *China Mechanical Engineering*, 2009, 20(22): 2737-2741. (in Chinese)
- [11] Mishra A, Gondal F M, Afrashteh A A, et al. Embedded wireless sensors for aircraft/automobile tire structural health monitoring [C] // 2006 2nd IEEE Workshop on Wireless Mesh Networks. Reston, VA, USA: [s. n.], 2006: 163-165.

- [12] Flammini A, Ferrari P, Marioli D, et al. Wired and wireless sensor networks for industrial applications [J]. *Microelectronics Journal*, 2009, 40(9): 1322-1336.
- [13] Hou L, Bergmann N W. Novel industrial wireless sensor networks for machine condition monitoring and fault diagnosis[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2012, 61(10): 2787-2798.
- [14] Sung W T, Chen J H, Hsu C C. WSN system based on weight adjust for machinery manufacturing machine monitoring [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, 300: 124-127.
- [15] 汤宝平, 贺超, 曹小佳. 面向机械振动监测的无线传感器网络结构[J]. *振动、测试与诊断*, 2010, 30(4): 357-361.  
Tang Baoping, He Chao, Cao Xiaojia. Topology of wireless sensor networks for mechanical vibration monitoring[J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2010, 30(4): 357-361. (in Chinese)
- [16] 汤宝平, 阮启东, 裴勇. 无线传感器网络倍增超周期多信道 MAC 协议设计[J]. *重庆大学学报: 自然科学版*, 2012, 35(11): 28-33.  
Tang Baoping, Ruan Qidong, Pei Yong. A novel wireless sensor network MAC protocol[J]. *Journal of Chongqing University: Edition of Science and Technology*, 2012, 35(11): 28-33. (in Chinese)
- [17] Kevan T. Shipboard machine monitoring for predictive maintenance[EB/OL]. [2006-02-01]. <http://www.sensorsmag.com/sensors-mag/shipboard-machine-monitoring-predictive-maintenance-715>.
- [18] Gao R X, Fan Z. Architectural design of a sensory node controller for optimized energy utilization in sensor networks[J]. *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on*, 2006, 55(2): 415-428.
- [19] Tan K K, Huang S N, Zhang Y, et al. Distributed fault detection in industrial system based on sensor wireless network [J]. *Computer Standards & Interfaces*, 2009, 31(3): 573-578.
- [20] Lu B, Gungor V C. Online and remote motor energy monitoring and fault diagnostics using wireless sensor networks[J]. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, 2009, 56(11): 4651-4659.
- [21] Nasipuri A, Alasti H, Puthran P, et al. Vibration sensing for equipment's health monitoring in power substations using wireless sensors[C]//*Proceedings of the IEEE SoutheastCon 2010*. Concord, NC, USA: [s. n.], 2010: 268-271.
- [22] Notay J K, Safdar G A. A wireless sensor network based structural health monitoring system for an airplane[C]//*2011 17th International Conference on Automation and Computing (ICAC)*. Huddersfield, UK: [s. n.], 2011: 240-245.
- [23] 蔡巍巍, 汤宝平, 黄庆卿. 面向机械振动信号采集的无线传感器网络节点设计[J]. *振动与冲击*, 2013, 32(1): 73-77.  
Cai Weiwei, Tang Baoping, Huang Qingqing. Design of wireless sensor network node for collecting mechanical vibration signals [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2013, 32(1): 73-77. (in Chinese)
- [24] 汤宝平, 曹小佳, 张国垒. 机械振动监测中的无线传感器网络时间同步研究[J]. *中国机械工程*, 2010(10): 1190-1194.  
Tang Baoping, Cao Xiaojia, Zhang Guolei. Time synchronization of wireless sensor networks for mechanical vibration monitoring [J]. *China Mechanical Engineering*, 2010(10): 1190-1194. (in Chinese)
- [25] Vogl A, Wang D T, Storás P, et al. Design, process and characterisation of a high-performance vibration sensor for wireless condition monitoring[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2009, 153(2): 155-161.
- [26] Kim S, Pakzad S, Culler D, et al. Health monitoring of civil infrastructures using wireless sensor networks [C]//*Proceedings of the 6th International Symposium on Information Processing in Sensor Networks*. Cambridge, MA, USA: [s. n.], 2007: 254-263.
- [27] Ahn G S, Hong S G, Miluzzo E, et al. Funneling-MAC: a localized, sink-oriented MAC for boosting fidelity in sensor networks[C]//*Proceedings of the 4th International Conference on Embedded Networked Sensor Systems*. New York: [s. n.], 2006: 293-306.
- [28] Berdy D, Srisungsitthisunti P, Jung B, et al. Low-frequency meandering piezoelectric vibration energy harvester[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, 2012, 59(5): 846-858.
- [29] Jang J, Berdy D, Lee J, et al. A wireless condition monitoring system powered by a Sub-100  $\mu$ W vibration energy harvester[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 2013, 60(4): 1082-1093.
- [30] Akyildiz I F, Jornet J M. Electromagnetic wireless nanosensor networks[J]. *Nano Communication Networks*, 2010, 1(1): 3-19.



**第一作者简介:**汤宝平,男,1971年9月生,教授、博士生导师。主要研究方向为无线传感器网络、机电装备安全服役与寿命预测、测试计量技术及仪器。曾发表《Method for eliminating mode mixing of empirical mode decomposition based on the revised blind source separation》(《Signal Processing》2012, Vol. 92, No. 1)等论文。

E-mail: bptang@cqu.edu.cn